

高圧噴射工法の設計方法に関する一考察について

STUDY OF DESIGN METHOD BASED ON DEEP BEAM THEORY FOR SOIL IMPROVEMENT OF STARTING AREA OF
SHIELD MACHINE USING THE JET GROUTING TECHNIQUE

浦沢義彦* ・ 竹内信次**

Yosihiko URASAWA and Sinji TAKEUTI

The jet grouting technique is often used to improve soft soil around starting area of shield machine. Thickness of the improving area is usually determined by a rather simple design method based on beam theory, slip circle theory and punching shear theory. However, it is necessary to consider behavior as deep beam of the improving area when its thickness is larger than tunnel diameter.

In this study, the deep beam behavior of the improving area is examined by 3-D FEM analysis, and a new design method based on the deep beam theory is proposed.

Keywords: jet groutig technique, deep beam theory, 3-D FEM, starting area of shield machine, soil improvement

1. まえがき

近年、立坑におけるシールドトンネル発進防護工法としては、高圧噴射工法が多く採用されるようになってきた。高圧噴射工法の設計は、図-1のように砂質土の場合、固結体を周辺地盤支持の円板と考え、曲げ応力度から必要厚さを設定している。

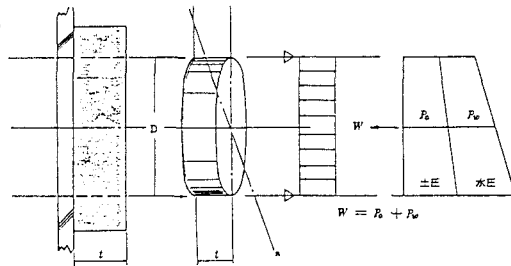


図-1 簡易モデル図

その他、土質によっては、円弧すべり、押し抜きせん断といった簡易的な解析により改良厚を決定しているのが一般的である。そこで本報告では、改良体の挙動を明らかにするために、三次元FEM、二次元FEM等を実施し、より詳細な検討を試みた。

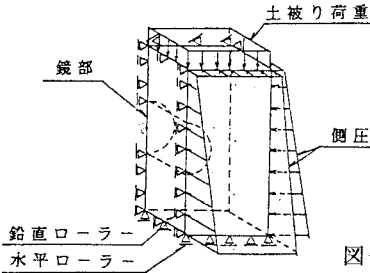
* 正会員 東京電力(株)地中線建設所 次長

**正会員 東京電力(株)地中線建設所 東京東工事事務所 土木課長

2. 三次元FEM解析による内部応力の状況

2・1 解析条件

図-2に解析概念図を示す。改良体の厚さは、2.0m, 3.0mおよび4.0mとした。



- ・上載荷重 : 土被り約24mを想定
- ・側圧 : 静止土圧
- ・改良体の物性 : 単位体積重量 1.56t/m³
変形係数 1000kgf/cm²
ポアソン比 0.3

図-2 解析概念図

2・2 解析結果

図-3に鉛直方向断面主応力図を示す。また、 $t=3m$ の場合について、主応力方向より45°の傾きで求めた最大せん断応力度の分布図を図-4に示す。さらに、円板曲げ理論の適用性をみるために、図-5のように鏡部中心の応力度と鏡部からの離れの関係をプロットした。これらより以下のことが言える。

- ① 鏡部の内部応力はアーチ形状をなしており、ディープビームにおける耐荷機構に近い。これは、側圧により端部が拘束されるためアーチが形成されていると考えられる。
- ② せん断応力度分布からは、鏡部付近の押し抜きせん断的な挙動は十分読み取れる。
- ③ 慣用設計法における円板曲げ理論を適用する場合、改良体内部における軸直角方向断面応力度分布が直線分布にならなければならない。(平面保持の仮定) しかし、図-5に示すとおり、 $t=2.0m$ では直線分布しているものの $t=3.0, 4.0m$ では平面保持は成立していない。従って円板曲げ理論が適用できるのは $D/t=2.8$ ($t=2.0m$) 程度以上の場合と考えられ、それ以下の時は円板曲げ理論は適用できない。

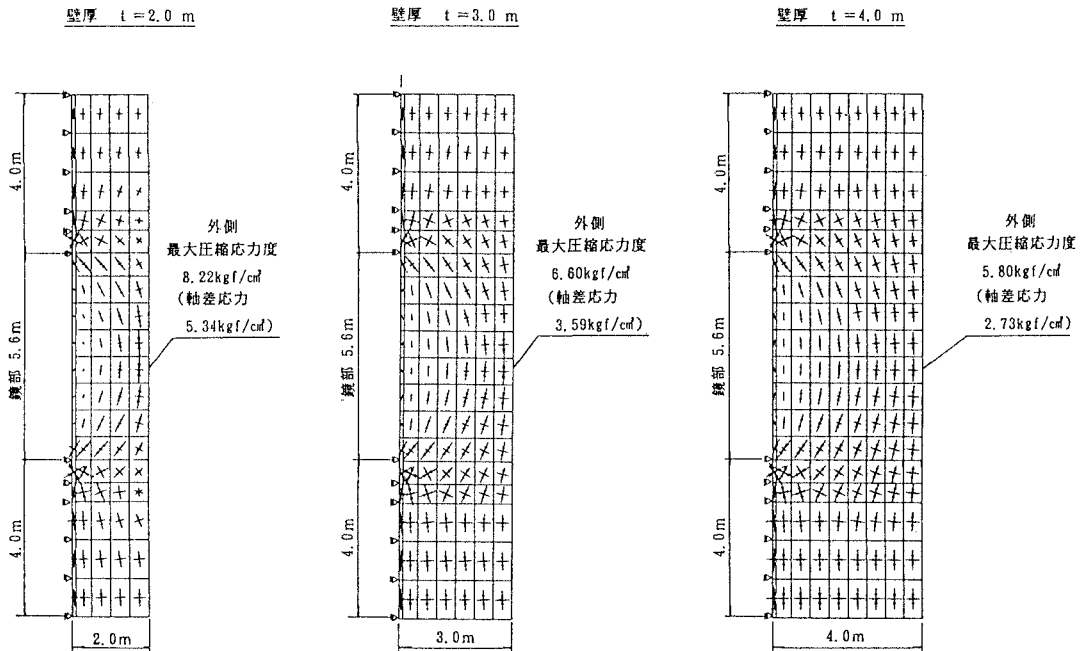


図-3 鉛直方向断面主応力図

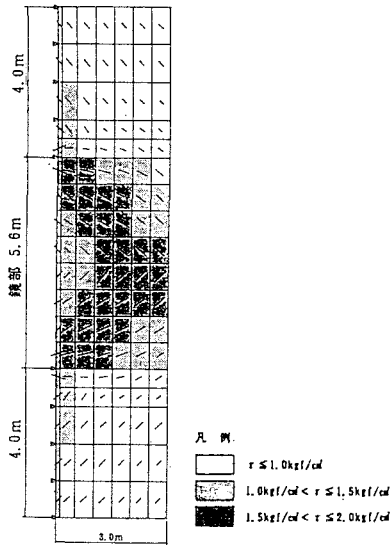


図-4 最大せん断応力度図

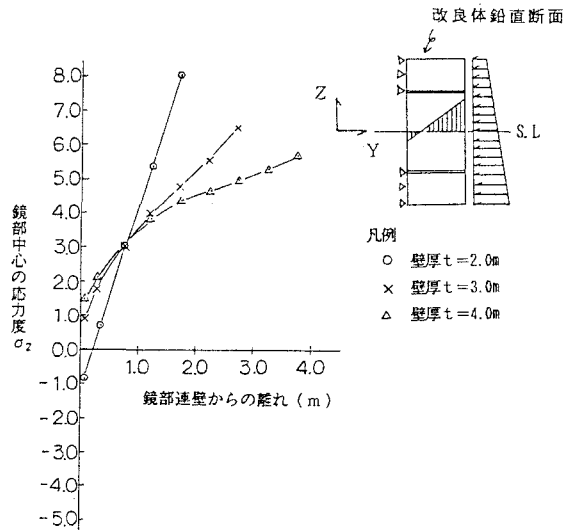


図-5 改良体鉛直方向断面内の応力度分布図

3. 二次元FEM解析によるディープビーム的耐荷機構の確認

水平方向の二次元FEMにより、引張破壊の進展を考慮した解析を行った。解析モデルは、壁厚を $t = 2.0\text{m}$, 3.0m , 4.0m の3ケースとし、壁厚の違いによる引張破壊の進展度合の違いとその結果生じる圧縮応力度の違いを比較した。

破壊の進展を考慮する方法としては、最初に全荷重を載荷し、引張破壊した要素の剛性を0にしてもう一度全荷重を載荷する。これを新たな破壊要素がなくなるまで繰り返す方法を用いた。

引張破壊の進展度合を図-6に示す。壁厚により破壊領域には顕著な差が見られる。

$t = 2.0\text{m}$: 壁厚の62.5% (1.25m) が破壊

$t = 3.0\text{m}$: 壁厚の25.0% (0.75m) が破壊

$t = 4.0\text{m}$: 壁厚の 2.5% (0.10m) が破壊

また、引張破壊の進展に伴って、有効壁厚が減少するため、圧縮応力(軸差)は増加する傾向にある。壁厚の薄いほど増加傾向が著しい。

$t = 2.0\text{m}$ ($D/t = 2.8$) : $8.3 \text{ kgf/cm}^2 \longrightarrow 10.5 \text{ kgf/cm}^2$ 27%増加

$t = 3.0\text{m}$ ($D/t = 1.9$) : $5.1 \text{ kgf/cm}^2 \longrightarrow 5.5 \text{ kgf/cm}^2$ 8%増加

$t = 4.0\text{m}$ ($D/t = 1.4$) : $3.6 \text{ kgf/cm}^2 \longrightarrow 3.6 \text{ kgf/cm}^2$ 増加なし

すなわち、破壊領域の進展がある範囲で止まり、安定を保つことのできる壁厚としては $D/t = 1.9 \div 2.0$ 程度が目安となることが確認できた。

4. 三次元を考慮した二次元FEM解析

高圧噴射工法による改良体のディープビーム的耐荷機構を期待するためには $D/t = 2.0$ がおよそその目安となることがわかった。

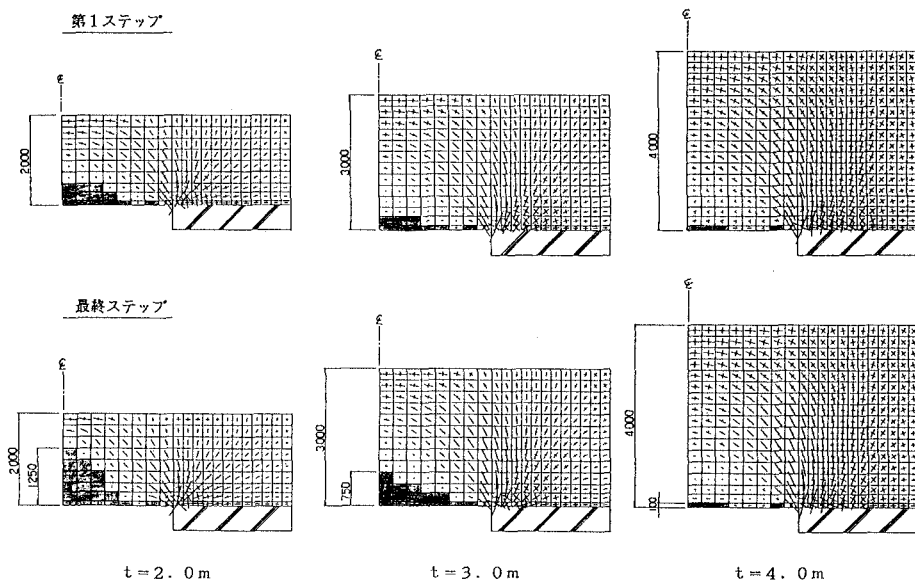


図-6 引張破壊領域の進展を考慮した二次元FEM解析結果

しかし、 D/t がそれ以下の場合、改良体の圧縮応力を照査する必要がある。ディープビーム的挙動を解析するにあたっては、FEMが必要となるが、三次元FEMをその都度計算することは、経済的な面からも考えにくく、そこで簡易に計算できる二次元FEMの代用モデルを考えた。

解析モデルは、図-7に示すように、三次元効果を期待したバネを設置した二次元平面ひずみモデルを用いる。改良体の物性、荷重条件は、前述の三次元モデルと同様とした。

三次元FEM解析における最大主応力と、二次元バネ有りモデルによるFEM解析における最大主応力の比 α を算定し、グラフ化したものを図-8に示す。

これより、三次元効果バネを用いた二次元FEMモデルによる最大圧縮応力は、三次元FEMにより得られた最大圧縮応力度とよく一致し、ディープビーム的挙動に対し圧縮応力度を照査する場合には、三次元モデルの代用として用いることができると考えられる。

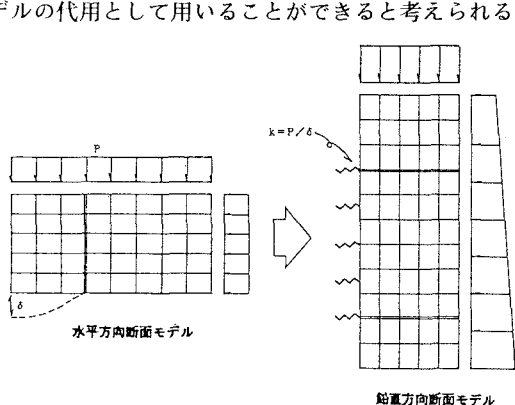


図-7 二次元平面ひずみモデル図

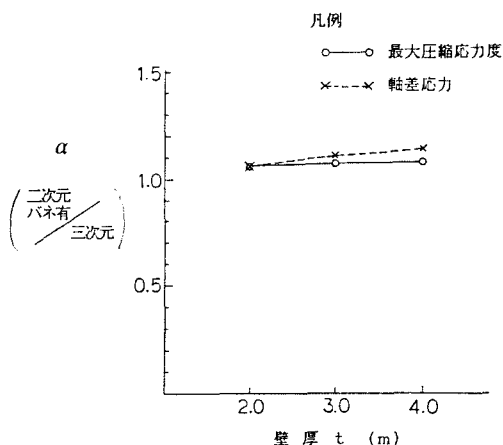


図-8 三次元モデルと二次元モデルの圧縮応力比

5. まとめ

- ①. 改良体の内部応力状況を、三次元FEMにより確認できた。
- ②. ディープビーム的耐荷機構を期待する壁厚の目安ができた。
- ③. 三次元効果を考慮した二次元FEMにより応力度の照査を行うことができた。